МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ
MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 621.9.648.4 https://doi.org/10.23947/1992-5980-2019-19-2-138-142

Влияние электроискрового легирования на механические свойства Al-Si-Cu сплавов*

Н. Е. Фомин[1], И. Х. Хасан[2], В. М. Кяшкин[3]**
[1, 2, 3] ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский государственный университет им. Н. П. Огарева», Саранск, Российская Федерация

Effect of electrospark doping on mechanical properties of Al-Si-Cu alloys***

N. E. Fomin[1], I. Kh. Khasan[2], V. M. Kyashkin[3]**
[1, 2, 3] Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russian Federation

Введение. Статья посвящена исследованию микротвердости и износостойкости алюминиевого сплава (АК5М7) после обработки его поверхности электроискровым легированием (ЭИЛ) электродами **А** (Cu) и **Р** (Cu + P) с разной приложенной энергией.

Цель работы — исследование взаимосвязи физико-механических и прочностных свойств поверхности сплава АК5М7, полученной после ЭИЛ медным и медно-фосфорным электродами.

Материалы и методы. Использованы методы рентгенодифракционного и рентгенофлуоресцентного анализа для определения фазового состава, областей когерентного рассеяния (ОКР) и микродеформации поверхности.

Результаты исследования. Установлено, что при использовании обоих видов электродов с увеличением энергии возрастают микротвердость и износостойкость. Образец был модифицирован электродом Р с энергией 0,79 Дж. В этом случае максимальное значение микротвердости увеличилось в 5,3 раза, износостойкости — в 1,6 раза. Установлено, что при ЭИЛ на поверхности исследуемого сплава образуются новые интерметаллические фазы Al_2Cu и Cu_3P. Если значение используемой энергии максимально (0,79 Дж), то концентрация фазы Al_2Cu увеличивается в 5 и 9 раз с электродами А и Р соответственно, а концентрация фазы Cu_3P увеличивается более чем в 4 раза при использовании электрода Р. Полученные экспериментальные данные свидетельствуют об уменьшении размеров ОКР и увеличении значений микродеформации для всех имеющихся на поверхности фаз Al, Al_2Cu и Cu_3P.

Обсуждение и заключения. Увеличение энергии при ЭИЛ приводит к повышению дефектности и изменению фазового состава вновь полученных поверхностей. Этим можно объяснить повышение износостойкости данной поверхности.

Introduction. Microhardness and wear resistance of the aluminum alloy (AK5M7) after its surface treatment through electrospark doping (ESD) using A (Cu) and P (Cu+P) electrodes with different applied energy is considered. The work objective is to study the relationship of the physicomechanical and strength properties of the surface of AK5M7 alloy obtained after ESD with copper and copper-phosphorus electrodes.

Materials and Methods. X-ray diffraction and X-ray fluorescence analysis methods were used to determine the phase composition, coherent-scattering regions (CSR), and the surface microstrain.

Research Results. It is established that with increasing energy, the values of microhardness and wear resistance increase when using both electrodes. The sample was modified by P electrode with the energy of 0.79 J. In this case, the maximum value of microhardness increased 5.3 times, wear resistance - 1.6 times. It is found that with ESD, new intermetallic phases of Al2Cu and Cu3P are formed on the surface of the alloy under study. If the value of the energy used is maximum (0.79 J), the concentration of the Al2Cu phase increases 5 and 9 times with A and P electrodes, respectively, and the concentration of the Cu3P phase increases more than 4 times when using P electrode. The experimental data obtained suggest size reduction of the CSR and an increase in the microstrain values for all the Al, Al2Cu, and Cu3P phases on the surface.

Discussion and Conclusions. An increase in energy with the ESD involves an increase in the defective factors and a change in the phase composition of the newly obtained surfaces. This may explain the increase in wear resistance of the surface.

Ключевые слова: электроискровое легирование (ЭИЛ), область когерентного рассеяния (ОКР), микродеформация, алюминиевые сплавы, интенсивность изнашивания.

Keywords: electrospark doping (ESD), coherent-scattering region (CSR), microstrain, aluminum alloys, wear rate.



*Работа выполнена в рамках инициативной НИР.
**E-mail: vice-rector@adm.mrsu.ru, srorismael@gmail.com, Kyachkin@mail.ru
*** The research is done within the frame of the independent R&D.

Образец для цитирования: Фомин, Н. Е. Влияние электроискрового легирования на механические свойств Al-Si-Cu сплавов / Н. Е. Фомин, И. Х. Хасан, В. М. Кяшкин // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2019. — Т. 19, № 2. — С. 138−142. https://doi.org/10.23947/1992-5980-2019-19-2-138-142

For citation: N.E. Fomin, et al. Effect of electrospark doping on mechanical properties of Al-Si-Cu alloys. Vestnik of DSTU, 2019, vol. 19, no. 2, pp. 138−142. https://doi.org/10.23947/1992-5980-2019-19-2-138-142

Введение. Для повышения износостойкости деталей используют различные покрытия и методы модификации поверхности. Один из них — электроискровое легирование (ЭИЛ) токопроводящих материалов (авторы: Б. Р. Лазаренко и Н. И. Лазаренко [1–4]).

Сплавы Al-Si-Cu широко используются в автомобильной промышленности. Они хорошо отливаются, обладают всеми необходимыми механическими свойствам, характеризуются низким коэффициентом теплового расширения и высоким соотношением прочности и веса. Однако твердость и износостойкость алюминиевых сплавов относительно низкие. Этим обусловлена актуальность задачи улучшения названных свойств за счет поверхностного упрочнения [5–10]. Речь идет о необходимости создания упрочненных слоев с улучшенными физико-механическими свойствами. В представленной работе показаны результаты ЭИЛ различными электродами при разных энергиях с целью упрочнения поверхности сплава АК5М7.

Материалы и методы. Для проведения исследований были изготовлены образцы размером 15×15×4 мм из алюминиевого сплава АК5М7. Их поверхности обрабатывались методом ЭИЛ медным и медно-фосфорным электродами. Элементный состав сплава и электродов определялся методом рентгенофлуоресцентного анализа на приборе ARL Perform’X 4200. Результаты приведены в табл. 1.

Таблица 1

Элементный состав сплава и электродов

	Al, %	Cu, %	Si, %	P, %
Сплав АК5М7	88	7	5	
Р-электрод		92,9		7,1
А-электрод	0,1	99,9		

Электроискровое легирование проводилось на установке ALIER-31 (фирма SCINTI, Молдова), которая позволяет проводить ЭИЛ в широком диапазоне энергий.

Рентгенофазовый анализ выполнялся с целью определения фазового состава покрытий, нанесенных методом ЭИЛ на алюминиевый сплав. Для съемки использовался рентгеновский дифрактометр PANalytical EMPYREAN на CuKα-излучении, укомплектованный никелевым фильтром с автоматической щелью расходимости первичного пучка. Рентгенограмма расшифровывалась с помощью программы HighScorePlus. Изучены:
— количественное содержание фаз, обнаруженных на поверхности;
— средний размер областей когерентного рассеяния (ОКР);
— величины микродеформаций после ЭИЛ образцов.

Микротвердость модифицированного слоя измерялась на поверхности, полученной после ЭИЛ. В работе использовали исследовательский комплекс на базе микротвердомера HVS-1000 и цифровую видеокамеру. Измерения выполнялись по ГОСТ 9450–76 с индентором в виде пирамиды Виккерса (нагрузка $P = 25$ г). По каждому образцу проводили не менее десяти измерений. Основной сплав и поверхности его образцов после обработки ЭИЛ подвергались трибологическим испытаниям (предварительно на поверхности образцов наносился смазочный материал).

Результаты исследования. Полученные результаты представлены в табл. 2 и на рис. 1–4.

Таблица 2

Концентрация фаз основного сплава и поверхностей, полученных после ЭИЛ в зависимости от энергии

Энергия, Дж	Концентрации фаз									
	Сплав АК5М7			А-электрод			Р-электрод			
	Al	Al_2Cu	Si	Al	Al_2Cu	Si	Al	Al_2Cu	Si	Cu_3P
0	92	2	4							
0,07				97	2	1	94	3	2	1
0,2				96	3	1	70	22	5	3
0,39				94	5	1	65	25	5	5
0,79				89	10	1	59	28	5	8

В табл. 2 приведены концентрации фаз, обнаруженных на поверхности основного сплава и образцов после ЭИЛ при различных энергиях.

В основном сплаве имеются три фазы: Al, Al_2Cu и Si. С повышением энергии ЭИЛ наблюдается увеличение концентрации Al_2Cu при использовании обоих электродов и уменьшение фазы Al, а фаза Si остается постоянной для А-электрода при всех энергиях. При этом концентрация Si возрастает в 2,5 раза с ростом энергии для Р-электрода. В образцах, обработанных Р-электродом, появляется фаза Cu_3P. Ее концентрация с повышением энергии импульса до 0,79 Дж возрастает в 8 раз.

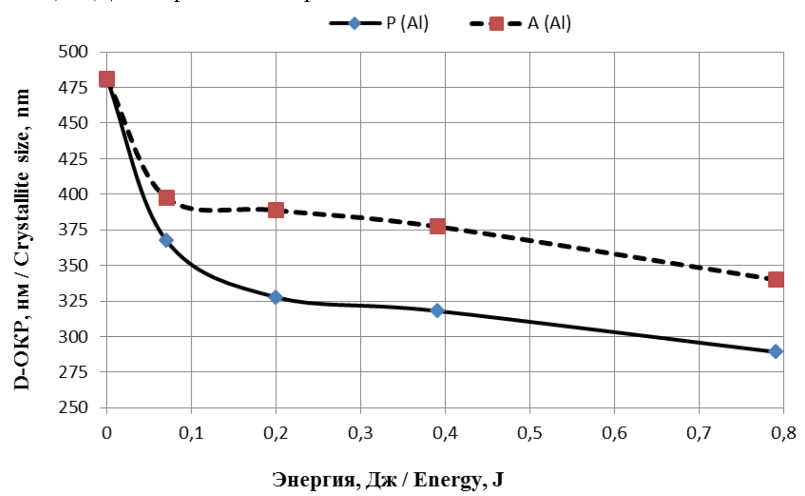


Рис. 1. Зависимость размеров ОКР фазы на основе Al от энергии для электродов А и Р

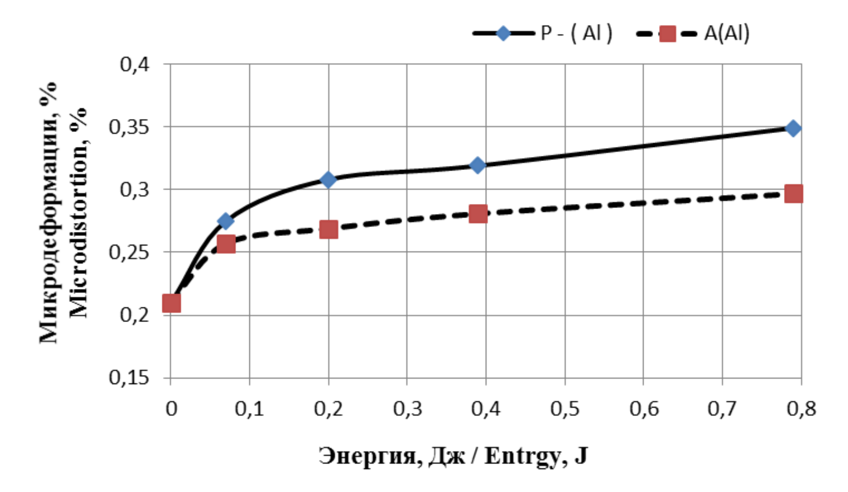


Рис. 2. Зависимость величины микродеформации фазы на основе Al от энергии для электродов А и Р

Из рис. 1, 2 видно, что при использовании обоих электродов с повышением энергии ЭИЛ уменьшается ОКР и увеличиваются микродеформации. Области когерентного рассеяния представляют собой практически бездефектные участки поверхности. Следовательно, увеличение ОКР свидетельствует об улучшении микроструктуры модифицированного слоя, уменьшении его дефектности. Вместе с тем известно, что изменение дефектности структуры металлических материалов приводит к изменению их физико-механических свойств [11, 12]. Величина микродеформации указывает на степень искаженности кристаллической решетки, и таким образом по ее величине можно судить о степени дефектности структуры [13, 14]. Аналогичные зависимости ОКР и микродеформации получены для фаз Al_2Cu и Cu_3P после ЭИЛ поверхности сплава АК5М7 электродами А и Р. При этом обнаружено, что закономерности изменения ОКР и микродеформации такие же, как для фазы на основе Al. Следовательно, данные рис. 1, 2 позволяют предположить, что с увеличением энергии сильнее искажается структура полученной поверхности.

На рис. 3 представлены результаты измерения микротвердости поверхностей после ЭИЛ медным и медно-фосфорным электродами.

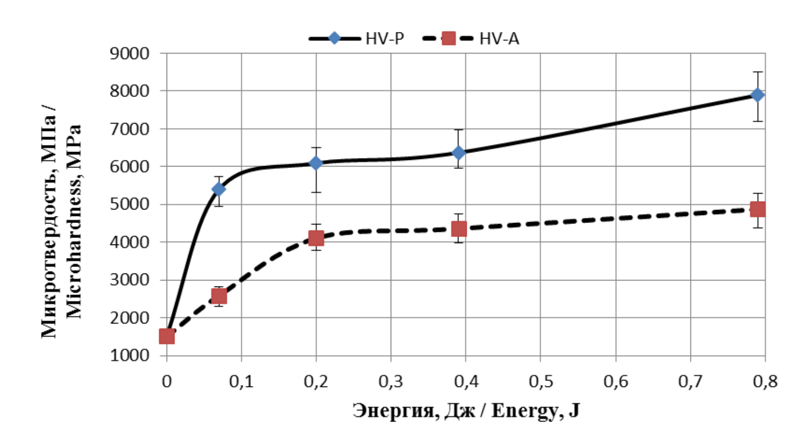


Рис. 3. Зависимость микротвердости от энергии для А- и Р-электродов

Видно, что микротвердость возрастает с увеличением энергии, причем для электрода А при максимальном значении энергии отмечается почти 3-кратный рост, для электрода Р — 5-кратный.

Известно, что при ЭИЛ происходит плавление материалов анода и поверхности образца, а затем быстрое охлаждение (закалка). В результате на поверхности могут образоваться новые фазы (в нашем случае Cu_3P), дислокации, точечные дефекты, высокая степень напряженного состояния поверхности, мелкозернистая структура и пр. В связи с этим можно предположить, что с ростом энергии микротвердость увеличивается из-за вышеперечисленных искажений, возникших в процессе ЭИЛ (см. рис. 3).

На рис. 4 представлены результаты измерения интенсивности изнашивания сплава АК5М7 и поверхностей образцов после ЭИЛ медным и медно-фосфорным электродами при энергии 0,79 Дж.

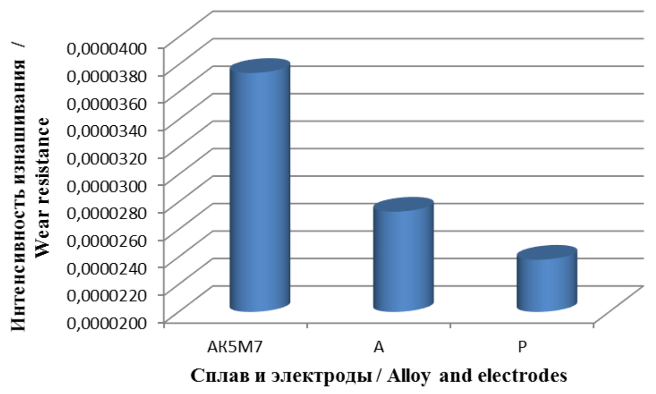


Рис. 4. Значения интенсивности изнашивания основного сплава АК5М7 и его поверхности после покрытия при энергии 0,79 Дж

Из рис. 4 видно, что поверхности образцов, обработанных медно-фосфорным и медным электродами, изношены значительно меньше, чем поверхность сплава АК5М7.

Обсуждение и заключения. Полученные результаты свидетельствуют об эффективности ЭИЛ поверхности сплава АК5М7 различными электродами и с разной энергией. Поверхности, полученные таким методом, изнашиваются меньше. При использовании медного электрода изнашивание сокращается в 1,37 раза, при использовании медно-фосфорного — в 1,57 раз.

При достижении минимального значения износа после ЭИЛ поверхности имеют максимальные значения микротвердости и микродеформации, а также наименьшие значения ОКР. При этом наблюдается значительный рост концентрации образующихся после ЭИЛ интерметаллических фаз: Al_2Cu — от 5 до 9 раз с медным и медно-фосфорным электродами соответственно; Cu_3P — в 8 раз с медно-фосфорным электродом. Причиной повышения износостойкости поверхностей после ЭИЛ могут быт различные искажения и дефекты, образующиеся после плавления, а также формирование новых интерметаллических фаз.

Библиографический список

1. Влияние природы электродных материалов на эрозию легированного слоя. Критерии оценки эффективности электроискрового легирования / А. Д. Верхотуров [и др.] // Вестник Мордовского университета. — 2018. — Т. 28, № 3. — С. 302−320. DOI: https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201803.302-320.

2. Изменение состава и свойств электрода-инструмента в условиях электроискрового легирования сплавом Al-Sn / Е. В. Юрченко [и др.] // Электронная обработка материалов. — 2016. — № 52 (2). — С. 32–36.

3. Исследование жаростойких свойств покрытий после электроискрового легирования стали 45 хромоникелевыми сплавами / А. В. Козырь [и др.] // Письма о материалах. — 2018. — № 8 (2). — Р. 140–145. DOI: 10.22226/2410-3535-2018-2-140-145.
4. Effect of Mg and Zn Contents on the Microstructures and Mechanical Properties of Al–Si–Cu–Mg Alloys / Y. Nemri [et al.] // International Journal of Metalcasting. — 2017. — № 12 (1). — С. 20–27.
5. Surface Modification of Aluminum Alloys Prepared by Plasma-Based-Ion-Implantation Technique / L. Liu [et al.] // Solid State Phenomena. — 2006. — № 118. — Р. 269–274.
6. Effect of Nickel addition and solution treatment time on microstructure and hardness of Al-Si-Cu aged alloys / H. M. Medrano-Prieto [et al.] // Materials Characterization. — 2016. — Vol. 120, October. — P. 168–174.
7. Effect of copper additions and heat treatment optimization of Al-7% Si Aluminum Alloy / M. T. Giovanni [et al.] // La Metallurgia Italiana. — 2016. — № 11. — P. 43–47.
8. Bogdanoff, T. Effect of Co and Ni addition on the microstructure and mechanical properties at room and elevated temperature of an Al-7% Si alloy / T. Bogdanoff, A. K. Dahle, S. Seifeddine // International Journal of Metalcasting. — 2018. — Vol. 12, is. 3. — P. 434–440. DOI 10.1007/s40962-017-0178-z.
9. Microstructure evolution and mechanical properties of laser additive manufacturing of high strength Al-Cu-Mg alloy / GuTao [et al.] // Optics and laser technology. — 2019. — № 112. — P. 140–150.
10. Олейник, А. К. Влияние кристаллизации под давлением и термообработки на триботехнические показатели и микротвердость сплава АЛ-25 / А. К. Олейник, Е. В. Чуйкова, А. В. Нестеренко // Вестник Харьков. нац. автомоб.-дорож. ун-та. — 2010. — Вып. 51. — С. 73–77.
11. Шаренкова, Н. В. Размеры областей когерентного рассеяния рентгеновского излучения в тонких пленках SmS и их визуализация / Н. В. Шаренкова, В. В. Каминский, С. Н. Петров // Журнал технической физики. — 2011. — Т. 81, вып. 9. — С. 144–146.
12. Солнцев, Ю. П. Материаловедение / Ю. П. Солнцев, Е. И. Пряхин. — Санкт-Петербург : Химздат, 2007. — 781 с.
13. Мельников, Е. В. Влияние температуры деформации на параметры структуры, фазовый состав и микротвердость монокристаллов стали Fe-28Mn-2.7Al-1.3C, подвергнутых кручению под высоким давлением / Е. В. Мельников, Е. Г. Астафурова, Г. Г. Майер // Letterson Materials. — 2018. — № 8 (2). — С. 178–183. DOI: 10.22226/2410-3535-2018-2-178-183.
14. Хасан, И. Х. Исследование физико-механических свойств алюминиевого сплава после электроискровой обработки / И. Х. Хасан, Н. Е. Фомин // Упрочняющие технологии и покрытия. — 2019. — Т. 15, № 3. — С. 139–142.

Сдана в редакцию 16.04.2019
Принята к публикации 07.05.2019

Об авторах:

Фомин Николай Егорович,
заведующий кафедрой «Физика твердого тела» Мордовского государственного университета
(РФ, 430005, г. Саранск, ул. Большевистская, 68а), кандидат физико-математических наук, профессор,
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7738-1839
vice-rector@adm.mrsu.ru

Хасан Исмаил Халил,
аспирант кафедры «Физика твердого тела» Мордовского государственного университета
(РФ, 430005, г. Саранск, ул. Большевистская, 68а),
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4560-1016
srorismael@gmail.com

Кяшкин Владимир Михайлович,
доцент кафедры «Физика твердого тела» Мордовского государственного университета
(РФ, 430005, г. Саранск, ул. Большевистская, 68а),
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0966-1190
Kyachkin@mail.ru